

На правах рукописи

БА Ибраима

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОГО  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ  
ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И  
ФЕРРОХРОМА**

Специальность 05.03.06 - технология и оборудование сварочного  
производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2002г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете СПбГТУ

Научные руководители:

доктор технических наук,  
профессор Башенко В. В.

доктор технических наук,  
профессор Клубникин В.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Дресвин С. В.

кандидат технических наук,  
с.н.с. Бурьяненко В. Д.

Ведущая организация: Институт сварки России

Защита диссертации состоится 5 апреля 2002 г. в 16 часов на заседании диссертационного Совета д 212. 229. 03 в Санкт- Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт – Петербург, Политехническая улица 29, хим. корпус, 51 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ)

Автореферат разослан 5 марта 2002 года.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета д 212. 229. 03  
доктор технических наук, профессор

Карпин В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Одной из важнейших задач современного этапа развития машиностроения является повышение качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Эта проблема особенно важна для Гвинеи, т.к. Республика Гвинея обладает большим парком машин и механизмов, работающих в различных областях индустрии и транспорта. В настоящее время многочисленные крупные предприятия, такие как “Pichinet” (Франция), “ALCO” (США), “Русский Алюминий” (Россия), добывающие боксит в разных районах Гвинеи, установили соответствующее оборудование и построили заводы, железные дороги и порты.

Кроме того, парк грузовых машин, железнодорожного и другого транспорта значительно увеличивается. При этом интенсивность износа деталей машин весьма велика, что связано с продолжительностью движения и с крутизной рельефа, который характерен для Гвинеи.

Основные проблемы, возникшие в результате индустриализации Гвинеи, в том числе трудности со снабжением запасными частями и удорожание механических деталей, требуют нового подхода к решению проблемы восстановления изношенных деталей.

Судя по данным научных исследований и промышленной практике, восстановление изношенных деталей весьма успешно производится с помощью плазменной технологии.

Соответственно технически и экономически целесообразно ориентировать технологию на ресурсные и производственные возможности Гвинеи (материалы и оборудование). Поэтому наиболее правильным путем представляется использование местного сырья: в первую очередь порошка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Этот материал является тугоплавким, поэтому требует использование плазменной технологии.

Анализ экспериментальных данных показывает, что покрытия из порошка оксида алюминия являются хрупкими. Поэтому увеличение пластичности таких покрытий достигается созданием соответствующих композиции сплавов например  $Al_2O_3 + FeCr$ ,  $Al_2O_3 + FeMg$ ,  $Al_2O_3 + FeH$  и т.д. При этом в работе предлагается применение смеси порошков оксида алюминия и феррохрома вследствие доступности этих материалов в Гвинеи.

**Цель и задачи работы:** Основной целью диссертации является изучение возможности использования технологии воздушно-плазменного напыления изношенных деталей нанесением покрытий из порошков оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и феррохрома. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

- Провести исследование, важного для Гвинеи покрытия из гвинейского порошка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), а также найти новые соединения с феррохромом ( $\text{FeCr}$ ) для достижения высоких механических свойств плазменных покрытий;
- Исследовать закономерность влияния режимных параметров плазменного напыления на прочностные показатели (скорость движения и температура частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и смеси в воздушной плазменной струе).
- Обосновать возможность достижения высокого качества покрытий на основе оксида алюминия и его смеси.

#### **Научная новизна:**

1. Исследованы новые составы порошкового покрытия оксида алюминия в смеси с феррохромом. Обнаружены удовлетворительные результаты прочности сцепления и износостойкости композиционного покрытия, содержащего 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_2$  + 25 %  $\text{FeCr}$ , с основой.
2. Обоснованы скорость движения и температура частиц композиции 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 %  $\text{FeCr}$ , позволяющие определить оптимальные режимы плазменного напыления данной смеси.
3. Произведено экспериментальное изучение износостойкости выбранной композиционной смеси порошков, напыленных на основу. Максимум по износостойкости дает состав 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_2$  + 25 %  $\text{FeCr}$ .

#### **Практическая значимость работы:**

Практическая значимость работы заключается в разработке и исследовании процесса воздушно-плазменного напыления покрытий из порошков оксида алюминия в смеси с феррохромом, важного для Гвинеи. Исследовании методом расчета скорости движения и температуры частиц композиции 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 %  $\text{FeCr}$  в воздушной плазменной струе. Экспериментальное определение износостойкости композиционной смеси порошков, напыленных на основу. Разработаны рекомендации по плазменному напылению данной композиции.

#### **Достоверность полученных результатов:**

Достоверность полученных результатов подтверждается проведенными экспериментами и расчетами. При проведении экспериментов использовался метод определения износостойкости покрытий, метод исследования внутренней структуры напыленных покрытий.

Расчеты скорости движения частиц порошкового материала по длине плазменной струи проводились при постоянных параметрах плазмы; расчеты температуры дисперсного материала в плазменном потоке проводились при постоянном значении температуры плазмы на начальной участке плазменной струи.

**На защиту выносятся:**

1. Режимы плазменного напыления термических покрытий из порошков оксида алюминия в смеси с FeCr, что важно для Гвинеи.
2. Результаты расчета скорости движения и температуры частиц композиции 75 %  $Al_2O_3$  + 25 % FeCr в плазменной струе.
3. Результаты экспериментального определения износостойкости композиционной смеси порошков, напыленных на основу.

**Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на 6-й международной конференции “ Пленки и покрытия ‘ 2001 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете (СПбГТУ), 3 – 5 апреля 2001.

**Структура и объём диссертации:** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 80 наименований. Она изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 22 рисунка и 22 таблицы.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Введение** содержит обоснование актуальности темы, цель работы, формулировку научной новизны и практической значимости работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор литературы по существующим технологиям воздушно-плазменного восстановления изношенных деталей, рассмотрены технология и способы газотермического нанесения покрытий, технология нанесения покрытий плазменным напылением и, в частности, воздушно-плазменным напылением, проанализированы свойства и характеристики наносимых покрытий.

Анализ работ показал, что одним из перспективных вариантов использования активной плазмообразующей среды является применение воздуха, которое значительно упрощает конструкцию установки для напыления и снижает себестоимость покрытий, повышает безопасность работ, позволяет создавать мобильные передвижные установки, не зависящие в процессе эксплуатации от поставки баллонов или резервуаров с газами.

Среди установок для напыления покрытий наиболее перспективными являются воздушно-дуговые плазмотроны типа ПНВ, где в качестве плазмообразующего газа используют только воздух. С помощью них можно напылять как металлические, так и оксидные и керамические материалы.

К преимуществам воздушных плазмотронов относится также то, что по сравнению с аргоном воздух обеспечивает значительное увеличение коэффициента теплоотдачи. В результате по оксиду алюминия производительность процесса увеличивается до 20 – 25 кг / час. Воздушно-

плазменное напыление обеспечивает также повышенную степень и равномерность проплавления частиц. Так, при напылении оксида алюминия для получения высококачественных корундовых покрытий, которые наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым промышленностью, применение воздуха в качестве плазмообразующего газа позволяет повысить степень проплавления частиц (В. В. Кудинов).

В практике воздушно-плазменного напыления покрытий обычно выделяют пять характерных типов сопряжений деталей, подлежащих восстановлению и упрочнению в результате механического износа. Для практического использования в Гвинее представляется наиболее важной возможность восстановления и упрочнения подвижных сопряжений с абразивным механическим износом деталей и знакопеременными нагрузками (шейки коленчатых валов и др.).

В главе также обоснован выбор порошкового материала оксида алюминия для воздушно-плазменного напыления.

Анализ свойств и характеристик покрытий из порошков простых оксидов, порошков сложных оксидов, порошков химических соединений оксидов по прочности сцепления, твердости, плотности, пористости, показывает, что достоинством процесса воздушно-плазменного напыления из оксида алюминия является получение качественных покрытий, не уступающих по характеристикам покрытиям с использованием других порошков. Так, например, прочность сцепления составляет не хуже 40 МПа, твердость более 35 HRC, пористость составляет 1 – 10 %.

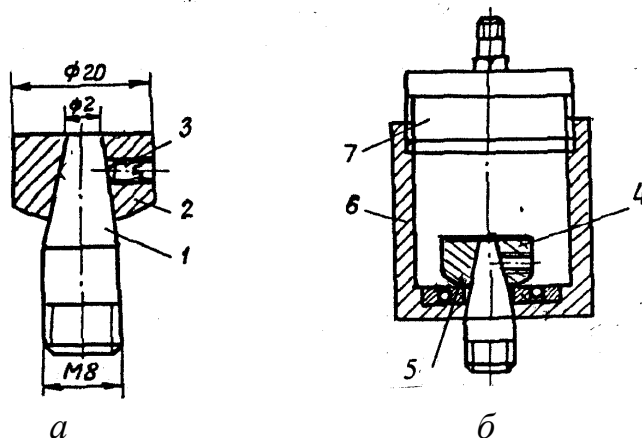
В связи с этим, в диссертационной работе сформулирована постановка задачи для применения покрытий на основе  $Al_2O_3$  в конкретных условиях в Гвинее.

**Во второй главе** подробно описана методика эксперимента. В главе проанализированы существующие методы определения прочности сцепления покрытий с основой, износостойкости покрытий, открытой пористости покрытий, метод исследования внутренней структуры напыленных покрытий. Сделан вывод о том, что рассмотренные методы позволяют провести комплексные исследования процессов воздушно-плазменного напыления для обеспечения качественных методов контроля характеристик материалов и покрытий.

**В третьей главе** описаны процесс и результаты исследования покрытий  $Al_2O_3 + FeCr$ , нанесенных воздушно-плазменным способом, изучены прочность сцепления, износостойкость и микрошлифы данных покрытий.

Было проведено лабораторное исследование прочности сцепления покрытий. При испытании была использована штифтовая методика. Схема устройства отображена на рис.1. При этом задачей исследования являлось сравнительное определение прочности сцепления покрытий следующих составов:

- 1- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 100 %,
- 2- FeCr, 100 %,
- 3- 25 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 75 % FeCr,
- 4- 50 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 50 % FeCr,
- 5- 75 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 25 % FeCr.



**Рис.1.** Схема образца (а) и устройства (б) для испытания на прочность сцепления покрытия с основным металлом методом конического штифта.

1- штифт; 2- оправка; 3- стопорный винт; 4- образец в сборе с нанесенным покрытием; 5- шаровая опора; 6- стакан; 7- крышка стакана.

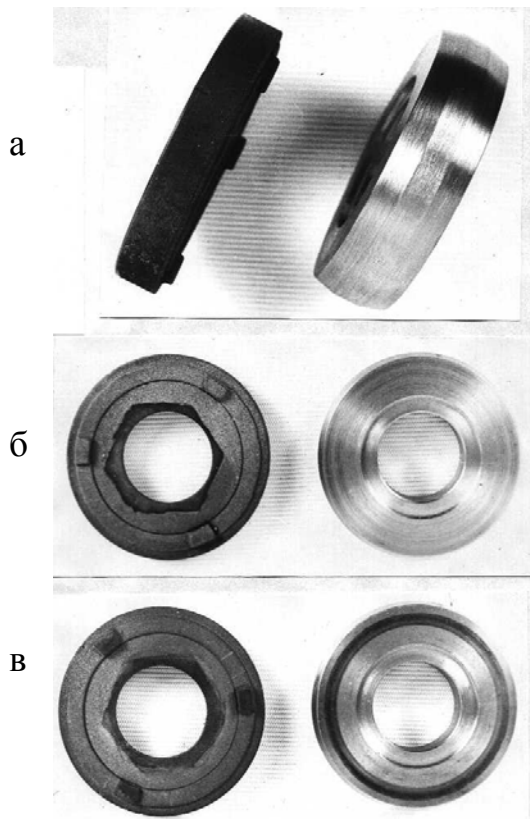
Таблица 1. Результаты испытания на прочность сцепления покрытий.

Составы	Прочность сцепления, МПа
1. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 100 %	35 - 40
2. FeCr , 100%,	40 - 50
3. 25% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 75% FeCr,	40 - 45
4. 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 50 % FeCr,	30 - 35
5. 75% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25% FeCr.	40 - 50

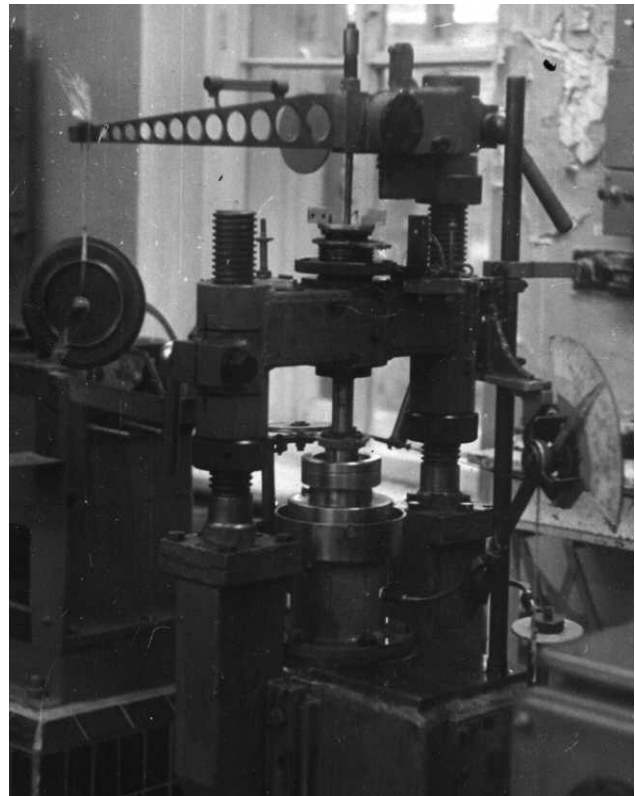
Исследование износостойкости покрытий проводилось после нанесения их на стальные подложки.

Покрытия наносились на стальные образцы пяточного типа (см.рис.2), которые при испытании своими выступами (пятками), общей площадью 75 мм<sup>2</sup>, прижимались с определенным усилием к торцевой поверхности другого образца – стальной шайбе. Последняя вращалась с заданной частотой относительно вертикальной оси.

Испытания проводились на двух установках: на машине трения Б-4 (см.рис.3) и на машине трения А. Принцип работ этих установок одинаков.



**Рис.2.** Стальные образцы для испытания.  
 а - Общий вид образцов;  
 б – до испытания; в – после испытания.



**Рис.3.** Машина трения Б-4.

Основные испытания проводились при скорости скольжения 0,1 м/с, нагрузке 0,08 МПа (0,8 кг/см<sup>2</sup>). Образцы до и после каждого испытания измерялись индикаторным настольным микрометром с ценой деления шкалы 1 мкм. Кроме того, после каждого испытания визуально и под микроскопом определялись размеры и форма пятен приработанной поверхности трения на выступах (пятках) верхнего образца и состоянии дорожки трения на нижнем образце (шайбе).

Результаты испытаний износостойкости покрытий смесей  $Al_2O_3 + FeCr$  приведены в таблице 2.



**Таблица 2.** Результаты испытаний износостойкости покрытий композиционной смеси  $Al_2O_3 + FeCr$ .

№ и состав покрытия	№ испытания	Средняя высота образца с покрытием, мм	Путь трения, км	Путь трения в одном испытании, км	Износ покрытия, мкм	Средний износ покрытия за километр пути трения, мкм/км
3 25% $Al_2O_3$ +75% FeCr		10,5653	0			
	3.1	10,5257	1,3956	1,3956	39,6	28,37
	3.2	10,5213	3,2452	1,8496	4,4	2,38
	3.3	10,5145	9,3954	6,1482	7,0	1,14
4 50% $Al_2O_3$ +50% FeCr		10,2708	0			
	4.1	10,2597	1,7957	1,7957	11,1	6,18
	4.2	10,2526	3,6827	1,8870	7,1	3,76
	4.3	10,2493	6,5722	2,8895	3,3	1,14
5 75% $Al_2O_3$ +25% FeCr		10,4126	0			
	5.1	10,3948	1,3150	1,3150	17,8	13,54
	5.2	10,3854	10,8687	9,5537	9,4	0,98

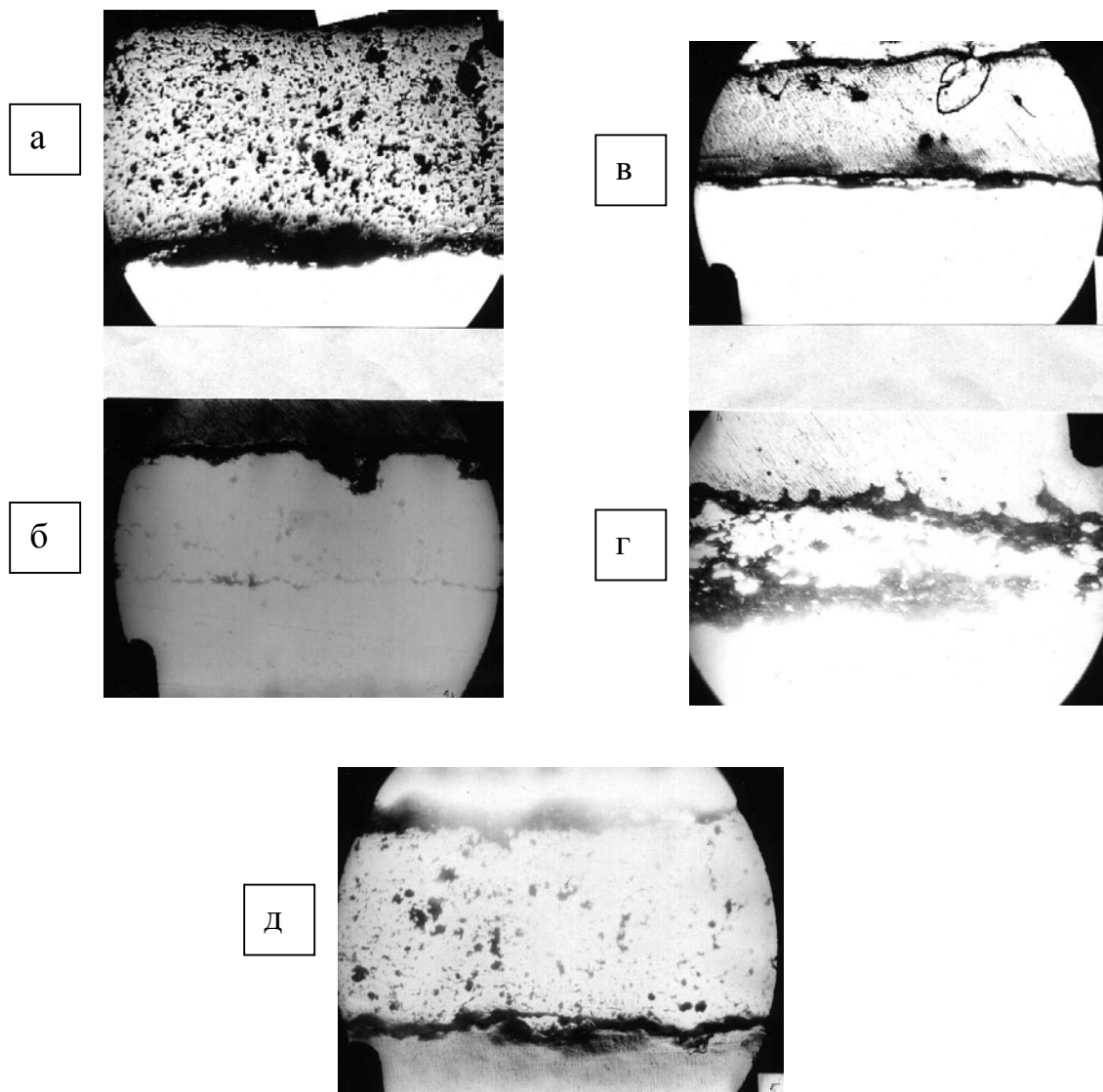
Как видно из таблицы, наиболее высокие показатели износостойкости дает 5-е покрытие (75 %  $Al_2O_3 + 25$  % FeCr).

Исследование микрошлифов покрытий (1–5) показало, что:

1. Микрошлиф покрытия (100 %  $Al_2O_3$ ) обладает наибольшей пористостью (см.рис.4а). На рисунке хорошо видно, что на поверхности существуют поры различного размера от 10 до 100 мкм.
2. Микрошлиф покрытия (100 % FeCr) обладает наименьшей пористостью (Рис.4б).
3. Микрошлиф покрытия (25 %  $Al_2O_3 + 75$  % FeCr) имеет достаточно небольшую пористость и хорошую структуру (4в).

4. Микрошлиф покрытия композиционной смеси (50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 50 % FeCr) имеет небольшую пористость, однако обладает нестабильной структурой (рис.4г).

5. Микрошлиф покрытия (75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 % FeCr) имеет стабильную структуру и меньшую пористость относительно смеси №1 (см.рис.4д).



а - б - в - г - д X 200

**Рис.4.** Микрошлифы покрытий из порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + FeCr.

а – 100 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; б – 100 % FeCr; в – 25 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 75 % FeCr;  
г – 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 50 % FeCr; д – 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 % FeCr.

**Вывод:** Анализ полученных результатов исследования износостойкости и микрошлифов покрытий из порошков оксида алюминия и феррохрома показывает, что наилучшими свойствами обладают покрытия из смеси, содержащей 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 % FeCr, что позволяет рекомендовать эту смесь для широкого применения.

**В четвертой главе** приведены расчеты скорости движения и температуры частиц смеси 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 % FeCr в плазменной струе. Известно, что прочность сцепления и плотность газотермических покрытий зависят от многих факторов, влияющих на взаимодействие материалов частиц и основы, однако главные из них – это скорость и температура частиц порошкового материала в плазменных струях.

При расчете скорости движения порошкового материала в плазменном потоке нам была использована широко применяемая методика расчетов В. В. Кудинова.

Для решения задачи о движении и температуре частиц в плазменной струе был сделан ряд упрощающих допущений:

- 1 – частицы являются сферическими и имеют одинаковый диаметр;
- 2 – распределение частиц по сечению канала сопла равномерное;
- 3 – частицы не взаимодействуют между собой и со стенкой сопла;
- 4 – присутствие частиц конденсированной фазы в плазме не влияет на термические свойства газа;
- 5 – испарения вещества частиц не происходит;
- 6 – расчеты производятся при постоянной температуре плазмы на начальной участке струи.

Учитывая эти допущения, скорость движения частиц в потоке плазмы ( $V_1$ ) определяется по формуле:

$$V_1 = V_{II} \sqrt{\frac{3\rho_{II} Cx}{2\rho_1 d}} x,$$

где  $x$  - путь, пройденный частицей;  $V_{II}$  - скорость плазмы;  $\rho_1$  - плотность материала частицы;  $\rho_{II}$  - плотность плазмы;  $d$  - диаметр частицы;  $Cx$  - коэффициент аэродинамического сопротивления частицы.

При расчете скорости движения частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  учитывалось, что плотность  $\rho_1 = 4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , диаметр частиц гвинейского порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  и  $V_{II} = 1000 \text{ м/с}$  (при использовании в качестве плазмообразующего газа воздух. При этом для напыления оксида алюминия температура плазменной струи принималась 7000, 8000 и 9000К.

Параметры плазмы при этих температурах приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Параметры плазмы при температурах струи 7000, 8000 и 9000 К.

Параметры плазмы	Температура плазмы		
	7000 К	8000 К	9000 К
$\rho_{\text{п}}$	$65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$57,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$50,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$
$\mu_{\text{п}}$	$229 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м.с}$	$251 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м.с}$	$272 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м.с}$

Образец расчета скорости частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводится ниже:

$$Cx = \frac{24}{\text{Re}}; \quad \text{Re} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}} \cdot d_{\text{ч}}}{\mu_{\text{п}}}, \quad \text{где } \mu_{\text{п}} - \text{вязкость плазмы.}$$

При температуре 7000 К,  $\mu_{\text{п}} = 229 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м.с}$ ;  $\rho_{\text{п}} = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  ;

$$\text{Re} = \frac{65,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{229 \cdot 10^{-6}} = 14,27 \Rightarrow Cx = \frac{24}{14,27} = 1,68$$

$$\text{Если } X = 50 \text{ мм, } V_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1000 \sqrt{\frac{3 \cdot 65,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} = 203 \text{ м/с}$$

$$X = 100 \text{ мм} \Rightarrow V = 287 \text{ м/с}; \quad X = 150 \text{ мм} \Rightarrow V = 352 \text{ м/с};$$

$$X = 200 \text{ мм} \Rightarrow V = 406 \text{ м/с.}$$

Результаты остальных расчетов приведены в таблицах 4 и 5.

При расчете скорости частиц FeCr учитывалось, что плотность

$$\text{FeCr } \rho_1 = 9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad d_{\text{ч}} = 50 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Образец расчета скорости частиц FeCr приводится ниже.

При температуре 7000 К,  $\rho_{\text{п}} = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  и  $\mu_{\text{п}} = 229 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м.с}$

$$\text{Re} = \frac{65,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{229 \cdot 10^{-6}} = 14,27 \Rightarrow Cx = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24}{14,27} = 1,68$$

$$\text{Если } X = 50 \text{ мм} \Rightarrow V_{\text{FeCr}} = 1000 \sqrt{\frac{3 \cdot 65,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} = 135,3 \text{ м/с.}$$

Результаты остальных расчетов приведены в таблицах 4 и 5.

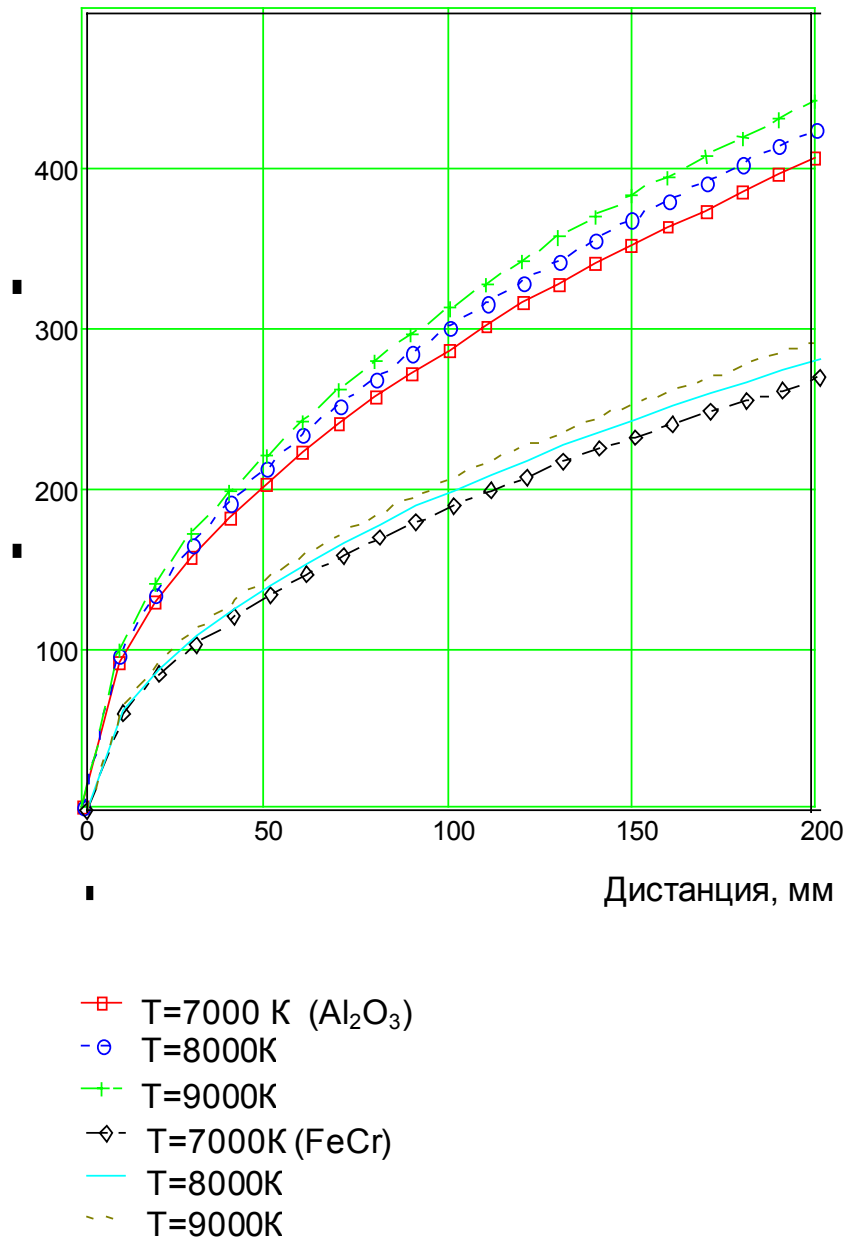
**Таблица 4.** Расчетные данные по скорости движения частиц 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 25 % FeCr.

Температура плазмы	Дистанция напыления, мм	Скорость, м/с.		Температура плазмы	Дистанция напыления, мм	Скорость, м/с.	
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeCr			$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeCr
7000 К	0	0	0	8000 К	0	0	0
	10	90	60,5		10	95	63,3
	20	128	85,5		20	134	89,6
	30	157	104		30	164,6	109,7
	40	181	121		40	190	126,7
	50	203	135,3		50	212,5	141,7
	60	222	148,2		60	232,8	155,2
	70	240	160		70	251,5	167,6
	80	257	171		80	268,8	179,2
	90	272	181,5		90	285,1	190,1
	100	287	191,3		100	300,6	200,4
	110	301	200,7		110	315,2	210,1
	120	315	209,6		120	329,2	219,5
	130	327	218,2		130	342,7	228,5
	140	340	226,4		140	355,6	237,1
	150	352	234,3		150	368,1	245,4
	160	363	242		160	380,2	253,4
	170	374	249,5		170	392	261,3
	180	385	256,7		180	403,2	268,8
	190	396	263,8		190	414,3	276,2
200	406	270,6	200	425,1	283,4		

**Таблица 5.** Расчетные данные по скорости движения частиц  
75 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 25 % FeCr.

Температура плазмы	Дистанция напыления, мм.	Скорость, м/с	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeCr
9000 К	0	0	0
	10	98,8	66
	20	139,7	93,2
	30	171,2	114,1
	40	197,7	131,8
	50	221	147,3
	60	242	161,4
	70	261	174,3
	80	279,6	186,4
	90	296,5	197,7
	100	312,6	208,3
	110	327,8	218,5
	120	342,4	228,2
	130	356,4	237,6
	140	369,8	246,5
	150	382,8	255,2
	160	395,4	263,6
	170	407,5	271,7
	180	419,3	279,6
	190	430,8	287,2
200	442	294,7	

Скорость, м / с



**Рис.5.** Изменение скорости движения частиц 75 %  $Al_2O_3$  + 25 % FeCr по длине плазменной струи.

Как видно из результатов расчетов, при увеличении температуры плазменной струи происходит незначительное изменение скорости движения частиц. В то же время при увеличении дистанции напыления наблюдается значительное увеличение скорости частиц (см.рис.5).

При расчете температуры дисперсного материала в плазменном потоке был использован метод разработанный Донским А. В.; Клубникиным В. С. Ими были предложены методики расчета температуры порошкового материала в плазменном потоке:

- а) для постоянной температуры плазмы;  
 б) для переменной температуры плазмы.

Несмотря на то, что вторая модель расчета (б) более точно отвечает технологическим процессам, она применяется редко из-за сложности определения технологических параметров.

В нашей работе была использована первая модель расчета (а). Она основывается на уравнении теплового баланса

$$\rho_q C_{pq} \frac{dT_q}{dt} = \frac{6T_q}{dt} = \frac{6\alpha_{II}}{d_q} (T_{II} - T_q) - \frac{6\varepsilon}{d_q} \sigma T_q^4 = 0,$$

позволяющего с высокой точностью рассчитать температуру частиц даже при широком диапазоне изменения характеристик плазмы. Формула расчета имеет следующий вид:

$T_q = T_{II} K_{\alpha} t + (1 - K_{\alpha} t) T_{q0}$ , где  $T_{II}$  - температура плазмы;  $K_{\alpha}$  - постоянный коэффициент;  $t$  - Текущее время;  $T_{q0}$  - температура частицы во время  $t = 0$ .  $K_{\alpha}$  рассчитывается следующим выражением:

$$K_{\alpha} = \frac{6\alpha}{\rho_q \cdot d_q \cdot C_{pq}}, \quad \text{где } \rho_q - \text{плотность материала частицы;}$$

$d_q$  - диаметр частицы;  $C_{pq}$  - теплоемкость плазмы при температуре частиц.

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_q}, \quad \text{где } \lambda - \text{теплопроводность; } Nu - \text{число Нусельта;}$$

$$Nu = Re^{0,6} \cdot P_q^{0,4}; \quad P_q = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = 0,7 \text{ -- } 1.$$

Ниже приводятся образцы расчетов для  $Al_2O_3$  и  $FeCr$ .

При температуре 7000 К: если  $X = 50$  мм;

$$T_q = T_{II} \cdot K_{\alpha} \cdot t + (1 - K_{\alpha} \cdot t) T_{q0}$$

$$X = 50 \text{ мм} \Rightarrow T_q = 1477 \text{ К}$$

$$X = 100 \text{ мм} \Rightarrow T_q = 7000 \cdot 732,6 \cdot 0,00034 + (1 - 732,6 \cdot 0,00034) 300 = 1968 \text{ К}$$

$$X = 150 \text{ мм} \Rightarrow T_q = 7000 \cdot 732,6 \cdot 0,00042 + (1 - 732,6 \cdot 0,00042) 300 = 2361 \text{ К}$$

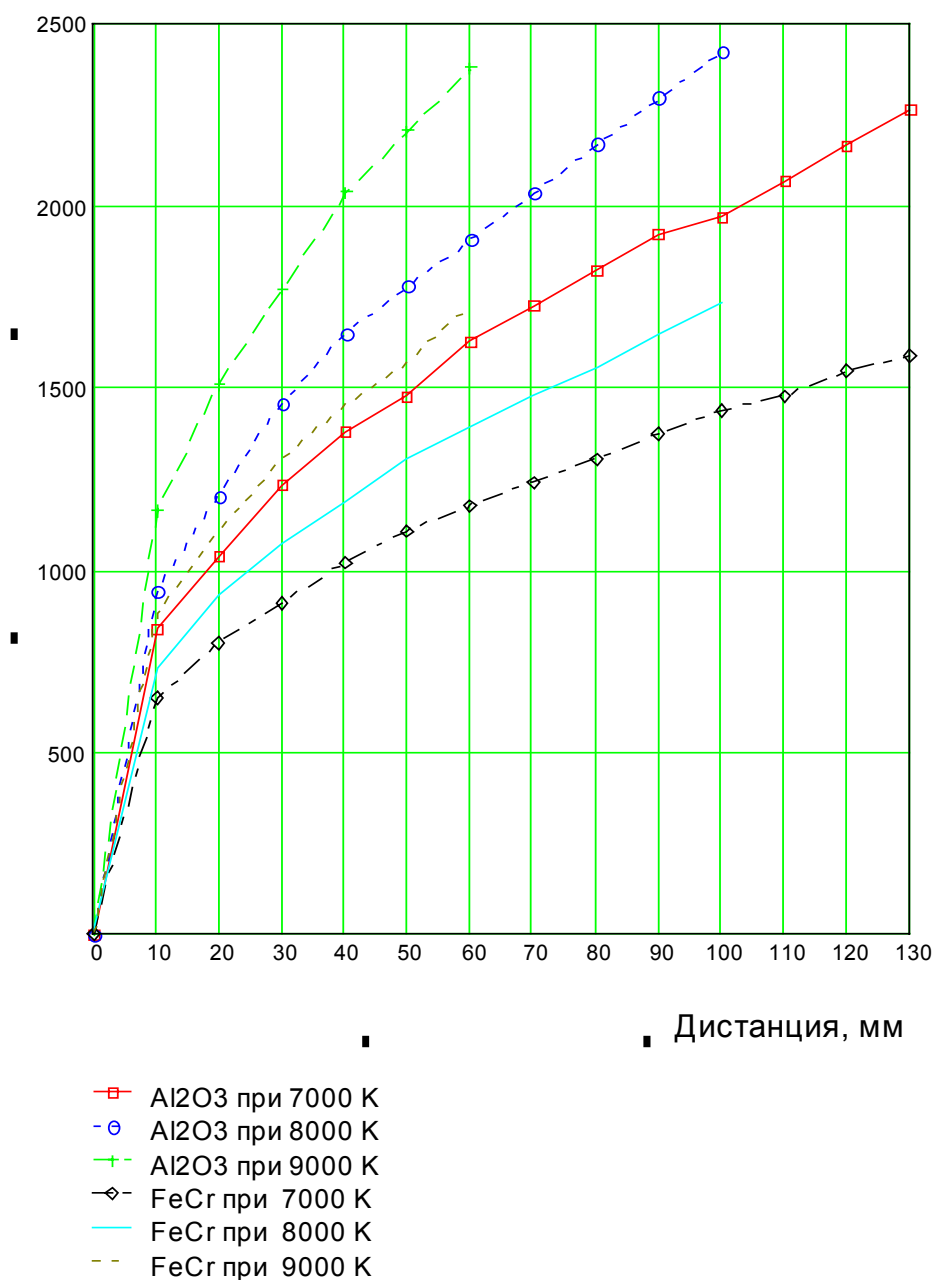
Результаты остальных расчетов приведены в таблице 6.



**Таблица 6.** Температура частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeCr}$  по длине плазменной струи \*

Температура плазмы, К	Дистанция напыления, мм.	Температура частиц, К	
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeCr
7000 К	0	0	0
	10	840	649
	20	1036	801
	30	1232	911
	40	1379	1020
	50	1477	1107
	60	1625	1172
	70	1723	1238
	80	1821	1303
	90	1919	1369
	100	1968	1434
	110	2067	1478
	120	2165	1543
	130	2263	1587
8000 К	0	0	0
	10	944	729
	20	1201	929
	30	1459	1072
	40	1652	1187
	50	1781	1301
	60	1910	1387
	70	2039	1473
	80	2168	1559
	90	2296	1645
	100	2425	1731
9000 К	0	0	0
	10	1166	877
	20	1513	1108
	30	1773	1300
	40	2035	1455
	50	2206	1570
	60	2380	1724

Температура, К



**Рис.6.** Изменение температуры частиц 75 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 25 % FeCr по длине плазменной струи.

*\* Расчеты при дистанции больше 60 мм являются приближенными*

Расчеты показывают, что при увеличении дистанции напыления происходит значительное увеличение температуры частиц. Однако, как видно из рисунка 6, увеличение дистанции напыления возможно лишь в определенных пределах. В противном случае температура частиц превышает температуру плавления. Так, в плазменной струе 9000 К максимально возможная дистанция напыления Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeCr 60 мм; в плазменной струе 8000 К – 100 мм; в плазменной струе 7000 К – 130 мм.

Произведенные расчеты скорости движения и температуры частиц композиционной смеси позволяют определить необходимые режимы напыления и условий нагрева частиц в плазменной струе. Такие результаты достигаются при использовании воздушного плазмотрона ПН-1В м2 (мощность 10 кВт, диаметр сопла 10 – 11 мм) в следующих режимах напыления:

**- При температуре плазмы = 7000 К:**

Ток дуги:  $I = 150$  А; Напряжение:  $U = 50$  В;

Расход воздуха:  $\Gamma_{\text{ВОЗ}} = 1 - 1,5$  г/с;

Расход транспортирующего газа:  $\Gamma_{\text{Т.ГАЗ}} = 10 \% \Gamma_{\text{ВОЗ}}$ .

Дистанция напыления:  $X = 130$  мм.

**- При температуре плазмы = 8000 К:**

Ток дуги:  $I = 180$  А; Напряжение:  $U = 50$  В;

Расход воздуха:  $\Gamma_{\text{ВОЗ}} = 1 - 1,5$  г/с;

Дистанция напыления:  $X = 100$  мм.

**- При температуре плазмы = 9000 К:**

Ток дуги:  $I = 200$  А; Напряжение:  $U = 50$  В;

Расход воздуха:  $\Gamma_{\text{ВОЗ}} = 1 - 1,5$  г/с;

Дистанция напыления:  $X = 60$  мм.

Технологическое оборудование фиксации и перемещения восстанавливаемых деталей определяется конструкцией последних и необходимой производительностью процесса.

### **Заключение, основные выводы.**

В работе представлено описание технологии воздушно-плазменного напыления изношенных деталей нанесением порошков на основе оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и феррохрома ( $\text{FeCr}$ ).

1. Проведено исследование покрытия из гвинейского порошка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
2. Проверено качество покрытий из ряда смесей порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeCr}$  и установлено, что наилучшими свойствами (низкая пористость и высокая износостойкость) обладает покрытие из смеси 75 %  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 25$  %  $\text{FeCr}$ , что позволяет рекомендовать эту смесь для широкого применения.
3. Исследована закономерность влияния режимных параметров плазменного напыления на прочностные показатели (скорость движения и температура частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и смеси с  $\text{FeCr}$  в воздушной плазменной струе). В частности определена зависимость твердости

покрытия (30 – 35 HRC) от скорости и температуры напыленных частиц. Чем больше скорость частиц тем выше твердость покрытия.

4. Для обоснования возможности достижения высокого качества покрытий на основе оксида алюминия и феррохрома проведены расчеты скорости движения и температуры частиц смеси 75 %  $Al_2O_3$  + 25 % FeCr в плазменной струе. Расчеты проведены для скорости движения и температуры частиц  $Al_2O_3$  и FeCr при температуре плазмы  $T = 7000, 8000$  и  $9000$  К. Экспериментальные данные лежат в этой области параметров.
5. Установлено, что при увеличении дистанции напыления происходит значительное увеличение температуры частиц. Однако увеличение дистанции напыления возможно лишь в определенных пределах. В противном случае температура частиц превышает температуру плавления.  
Также установлено, что значительное увеличение скорости движения частиц может быть достигнуто при увеличении дистанции напыления.
6. На основе произведенных расчетов скорости движения и температуры частиц композиционной смеси определены необходимые режимы напыления и условий нагрева частиц в плазменной струе, и выбрана конструкция плазмотрона.

Основные положения диссертации изложены в следующей публикации:

Клубникин В.С., Ба Ибраима. Износостойкость покрытий из смеси оксида алюминия и хромового сплава.- СПбГТУ // 6-я международная конференция "Пленки и покрытия ' 2001". с.406 - 408.